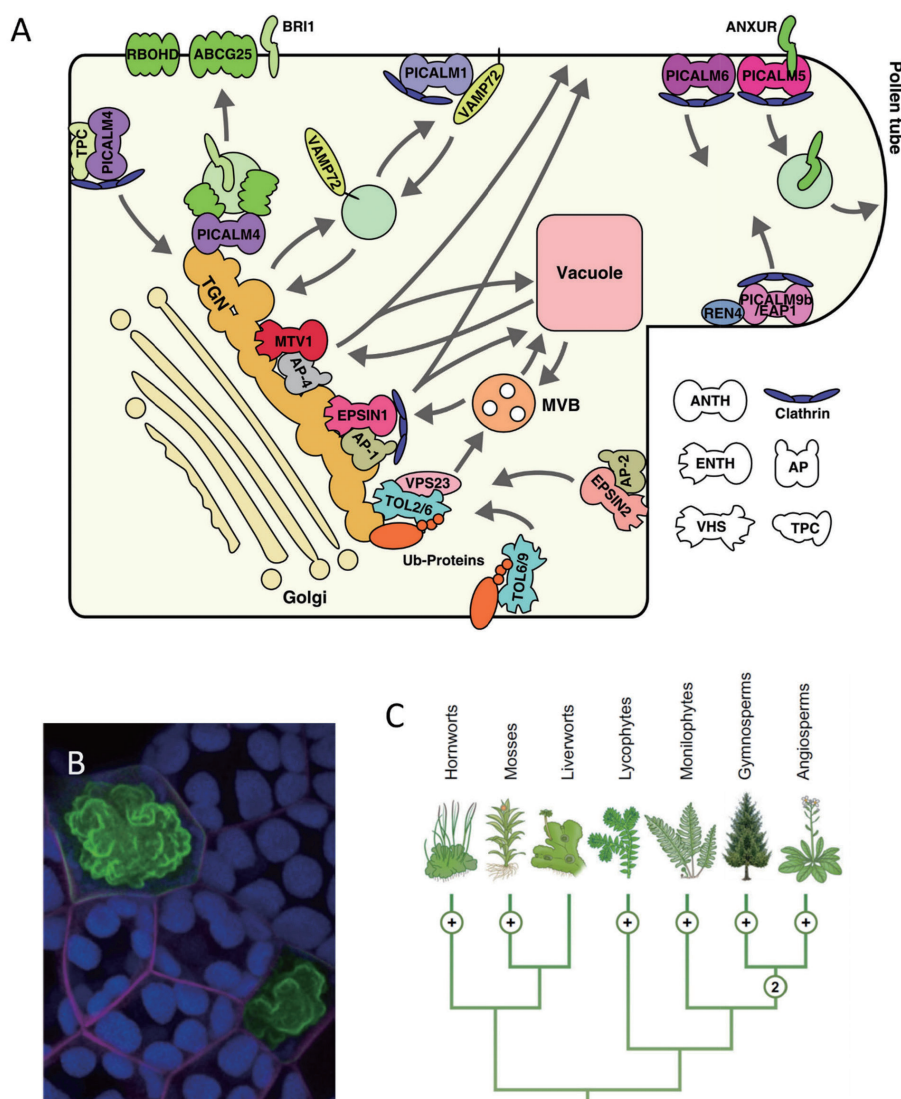


植物の膜交通研究から探る

細胞内輸送のメカニズムと進化

真核生物の細胞内には、小胞体やゴルジ体など様々なオルガネラがあり、それぞれが独自の機能を果たすことで生命現象が成り立っています。これらのオルガネラ間では小胞や細管を介した膜交通と呼ばれるメカニズムによって物質が運ばれています。膜交通の基本的なメカニズムは真核生物において広く保存されていますが、それぞれの生物が独自の膜交通の仕組みを有していることも明らかになりつつあります。我々は、シロイヌナズナとゼニゴケを用いて、植物における膜交通の普遍性と独自性を明らかにするべく研究を行なっています。



Staff

教授

上田 貴志

准教授

伊藤 瑛海

助教

金澤 建彦

特任助教

Hugh Mulvey

技術課技術職員

林 晃司

植物細胞における膜交通経路の多様化

(A) シロイヌナズナの細胞膜やtrans-Golgi network (TGN) では様々なアダプタータンパク質複合体が積荷タンパク質を選別している (文献5,6に関連)。(B) ゼニゴケ葉状細胞において、分泌経路ではたらく膜融合因子 (SNARE) の一種であるMpSYP13B (マゼンタ) は細胞膜に局在するのに対し、ホモログであるMpSYP12B (緑) は油体膜に主に局在する。分泌経路で機能するSNARE分子の機能が進化の過程で多様化していることが分かる。(C) 植物の形態形成を制御する分子スイッチであるROP GTPaseの機能は進化の過程で拡張・多様化し、陸上植物の形態進化を支えてきた。(文献3より改変)

植物に特徴的なオルガネラと膜交通

膜交通は、小胞や細管状の輸送中間体を介したオルガネラ間の物質輸送システムである。そこではRAB GTPase、SNARE、被覆複合体などが機能しており、これらの因子の亜機能化や新機能獲得が、オルガネラの多様化と密接に関連していると考えられている。当部門では、膜交通とオルガネラ機能の多様化の観点から、植物の膜交通のなりたちと制御機構の研究を進めている。

植物の液胞は不要タンパク質の分解を担うことに加え、タンパク質の貯蔵や膨圧の発生など、植物に特有の機能も有している。このような多様な液胞機能の発現には、液胞ではたらくタンパク質や液胞に貯蔵されるタンパク質を、正確かつ大量に液胞に輸送する仕組みが必要である。植物における液胞輸送は、真核生物に共通の仕組みに、進化の過程で新たに獲得された制御機構が加わることで成り立っていることが明らかになってきた（文献1,2）。我々は、植物固有の液胞輸送経路について、その獲得の歴史と制御メカニズムを明らかにするべく研究を進めている。

並行して、コケ植物苔類ゼニゴケを用いた研究も進め、シロイヌナズナの研究から得られた知見と統合することにより、陸上植物における膜交通の多様化の仕組みを解明することも目指している（文献3）。例えば、苔類のみで見られるオルガネラである油体が、細胞外および細胞膜へ物質を輸送する分泌経路の方向を、一時的に細胞内方向へと転換することで形成されることを見出した。また、油体発生のマスター転写因子であるMpERF13を同定し、油体が捕食者に対する防御に役立つことも証明した（文献4）。現在は油体形成過程における分泌経路の方向転換機構の解明を進めている。

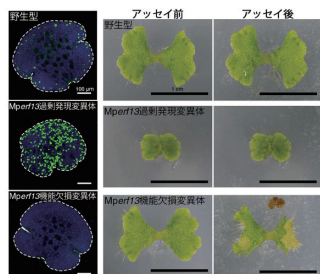


図1. 油体の形成と機能
油体形成マスター転写因子MpERF13の過剰発現変異体では油体が過剰に形成され、機能欠損変異体では油体が全く形成されない。オカダンゴムシを用いた被食アッセイでは、油体を持たない変異体が多く被食される（文献4）。

膜交通の多様化と膜交通因子の新機能化

膜交通因子の分子進化は、膜交通の多様化に密接に関連している。例えばエンドソームと液胞膜融合を担うSNAREタンパク質VAMP727は、そのタンパク質に生じた「挿入配列の出現」と「その配列の酸性化」に伴い、積み荷選別タンパク質複合体AP-4との結合能の獲得とその強化という段階的な機能変化を経て生まれたことを解明した（文献2）。

また、液胞膜との膜融合に使われたVAMP727の細胞内動態を詳細に観察することで、液胞からの逆行輸送の存在を証明し、その過程に関与する分子群を同定することに成功した（文献1）。これらの研究は、種子植物に特有の形質である貯蔵タンパク質の液胞への大量輸送能が、VAMP727のような植物特異的な膜融合装置とその液胞膜からのリサイクリング機構を背景に獲得されたことを示唆している（文献1,2,6）。一方、進化的に保存された極性形成因子であるROP GTPaseについては、進化の過程での転用や機能拡張を通して植物形態の多様化を駆動してきたと考えられており、その実験的な証明を目指して、ゼニゴケとシロイヌナズナ、緑藻類などを用いた比較解析を展開している（文献3）。引き続き、膜交通とオルガネラ機能、植物の形態の進化・多様化の観点から、植物の膜交通システムの仕組みとその成り立ちを明らかにするべく研究を進めている。

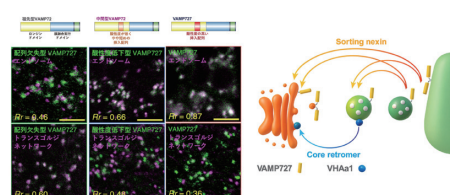


図2. VAMP727の分子進化と膜交通経路の多様化

（左図）植物の進化の過程でVAMP7に起きた段階的な機能変化が、種子植物に特有の液胞輸送経路の成立に至る鍵となった（文献2より改変）。（右図）VAMP727を液胞膜から回収する細胞内輸送経路の存在を証明し、その過程にsorting nexinが関わることを明らかにした（文献1より改変）。

参考文献：

- Feng, Y., Ebine, K., Ito, Y., Kanazawa, T., Sawasaki, T., Nozawa, A., Uemura, T., Nakano, A., and Ueda, T. (2025). Retrieval from vacuolar and endosomal compartments underpinning the neofunctionalization of SNARE in plants. *Nat. Plants*, 11, 2168–2180.
- Fujimoto, M., Shimizu, Y., Ito, Y., Ebine, K., Minamino, N., Kanazawa, T., Fukao, Y., Nakano, A., Uemura, T., and Ueda, T. (2025). Neofunctionalization of VAMP7 opened up a plant-unique vacuolar transport pathway. *Curr. Biol.* 35, 2630-2641.e10.
- Mulvey, H., and Dolan, L. (2025). The evolution of RHO of plant (ROP) proteins and their morphogenetic functions. *New Phytol.* 248, 542–548.
- Kanazawa, T., Morinaka, H., Ebine, K., Shimada, T.L., Ishida, S., Minamino, N., Yamaguchi, K., Shigenobu, S., Kohchi, T., Nakano, A., and Ueda, T. (2020). The liverwort oil body is formed by redirection of the secretory pathway. *Nat. Commun.* 11, 6152. *Selected as a featured article in *Nat. Commun.*
- Fujimoto, M.*, Ebine, K.*, Nishimura, K.*, Tsutsumi, N., and Ueda, T. (2020). Longin R-SNARE is retrieved from the plasma membrane by ANTH domain-containing proteins in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 117, 25150-25158.
- Takemoto, K., Ebine, K., Askani, J.C., Krüger, F., Ito, E., Goh, T., Schumacher, K., Nakano, A., and Ueda, T. (2018). Distinct sets of tethering complexes, SNARE complexes, and Rab GTPases mediate membrane fusion at the vacuole in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115, E2457–E2466.

教授
上田 貴志

准教授
伊藤 瑛海

助教
金澤 建彦

特任助教
Hugh Mulvey

